

Jani Alajärvi

ILMALAUHDUTUSJÄRJESTELMIEN SOVELTUVUUSTUTKIMUS
VOIMALAITOKSILLE

Energiatekniikan koulutusohjelma
Energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto
2011

Jani Alajärvi

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Energiatekniikan koulutusohjelma

Marraskuu 2010-11-18

Zenger Pekka

Sivumäärä: 33

Avainsanat: Lauhdutin, jäähdytystorni, märkä jäähdytys, kuiva jäähdytys, ilmalauhdutus

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on vertailla Prosim-simulointiohjelman avulla höyryn vaihtoehtoisia lauhdutustapoja voimalaitosympäristössä. Työn tilaaja on Alfa Laval Oy, joka oli erityisen kiinnostunut välillisestä ilmalauhdutuksesta. Työn painopisteenä on välillinen ilmalauhdutus verrattuna perinteisiin lauhdutus- menetelmiin kuten suoravesilauhdutus ja jäähdytystornilauhdutus sekä suorailmalauhdutus.

Työn suorittamiseksi eri lauhdutusmenetelmien hyötyteho selvitettiin simuloimalla tilanteita Prosim-simulointiohjelman avulla. Simuloinnissa etsittiin jäähdyttävän fluidin eri lämpötila-arvoilla hyötytehon optimi ja tuloksia verrattiin keskenään.

Työn ja tulosten tarkastelun yhteydessä huomattiin lisäksi asioita, joita olisi hyvä selvittää jatkossa.

SUITABILITY STUDY OF AIR-COOLED CONDENSING SYSTEMS FOR POWER PLANTS

Jani Alajärvi

Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Energy Technology

November 2010-11-18

Zenger Pekka

Number of pages:33

Key words: condenser, cooling tower, wet cooling, dry cooling, air cooled condenser

The aim of this thesis was to compare different steam condensing forms with the help of the Prosim simulation program. The customer of this thesis was Alfa Laval which was especially interested in indirect air condensing. The main point of this work was to compare indirect air condensing to traditional condensing methods, such as water condensing, cooling tower and air cooled condensing.

To carry out the work, useful power of different condensing methods was researched with the help of the Prosim simulation program. In the simulation the optimal useful power was searched at different cooling fluid temperatures and the results were compared.

When examining the results, some issues were observed which should be clarified in the future.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	ALFA-LAVAL OY	6
3	LAUHDUTTIMIT	6
3.1	Suora vesilauhdutus	7
3.1.1	Hyödyt.....	8
3.1.2	Haitat	8
3.2	Jäähdytystorni lauhdutus.....	9
3.2.1	Hyödyt.....	10
3.2.2	Haitat	10
3.3	Suora ilmalauhdutin	11
3.3.1	Hyödyt.....	12
3.3.2	Haitat	12
3.4	Välillinen ilmalauhdutus.....	13
3.4.1	Hyödyt.....	13
3.4.2	Haitat	14
4	VOIMALAITOSPROSESSIN SIMULOINTI.....	14
4.1	Ilmajäähdytys.....	15
4.1.1	Pumppu.....	16
4.1.2	Puhallin.....	18
4.1.3	Tulokset.....	18
4.1.4	Yhteenveto	19
4.2	Lauhdutus vedellä	20
4.2.1	Tulokset.....	21
4.3	Vesitornilauhdutus	22
4.3.1	Tulokset.....	23
4.4	Suora ilmalauhdutus	24
4.4.1	Tulokset.....	24
5	ERI LAUHDUTUSMENETELMIEN VERTAILU	26
5.1	Simulointitulosten vertailu.....	26
5.2	Eri lauhdutusmenetelmien vertailu.	26
5.3	Yhteenveto ja loppupäätelmät	28
	LÄHTEET.....	30
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on vertailla Prosim-simulointiohjelman avulla höyryn vaihtoehtoisia lauhdutustapoja. Työn tilaaja Alfa Laval Oy on erityisen kiinnostunut välillisestä ilmalauhdutuksesta. Työn painopisteenä on välillinen ilmalauhdutus verrattuna perinteisiin lauhdutusmenetelmiin kuten suoravesilauhdutus ja jäähdytystornilauhdutus sekä suorailmalauhdutus.

Tässä työssä ei tarkastella kattilan lämpötehoa eikä laitoksen hyötysuhdetta. Eri menetelmien vertailuna käytetään turbiinista saatavaa akselitehoa ja saatua hyötytehoa, jolla tässä työssä tarkoitetaan generaattorin sähkötehon ja lauhdutukseen tarvittavien apulaitteiden sähkönkulutuksen erotusta. Hyötysuhdetta ei tarkastella, koska työn tarkoitus on simuloida eri lauhdutusmenetelmiä ja sen vaikutusta turbiinista saatavaan akselitehoon. Koko laitoksen hyötysuhteeseen vaikuttaisi liikaa esimerkiksi käytettävä polttoaine ja lisälaitteet, joilla kattila varustetaan. Otettaessa huomioon koko laitoksen hyötysuhde tulisi simuloinnista hankala ja pitkä, jolloin pääpaino poistuisi todellisesta aiheesta. Pääpiirteittäin voidaan kuitenkin sanoa, että laitoksen hyötysuhde on sitä parempi mitä matalampi lauhdutusaine on ja siten myös lauhdutuslämpötila. /4/

2 ALFA LAVAL OY

Alfa Laval on suuri kansainvälinen yritys, jonka tuotteisiin kuulu erilaisia tuotteita lämpö-, erotus- ja virtaustekniikkaa. Yritys työllistää 11500 työntekijää ja yhtiöllä on 20 tuotantoyksikköä. /1/

3 LAUHDUTTIMIT

Lauhdutin on lämmönsiirrin, jossa kaasumaisen aine lauhtuu eli muuttuu nesteeksi ja missä kaasumaisen aineen lauhdutuslämpötila johdetaan pois toiseen virtaavaan fluidiin. Lämpötila pysyy lauhtumisen aikana vakiona. Lauhtumisen aiheuttavan jäähdyttävän fluidin virtaus poistuu lauhduttimesta hieman korkeammassa lämpötilassa kuin lauhtuvan aineen lämpötila on. Näiden lämpötilojen erotusta kutsutaan lauhduttimen ja lämmönvaihtimien asteisuudeksi. /2,3/

Tavallisesti voimalaitossovelluksissa höyry lauhtuu vedeksi ja lauhtumislämmön pois johtava aine on vesi. Jossain erikoistapauksissa lauhtuva aine voi sopiva orgaaninen neste (orc-prosessi) ja lauhtumislämmön poistoväline voi olla ilma. Orc-prosessi on vasta kokeiluasteella, mutta suoria ilmalauhduttimia on olemassa alueille, missä ei ole juurikaan vettä. Sähkötehon lisäämiseksi lauhduttimessa pyritään pitämään mahdollisimman alhaista painetta mahdollisimman kylmän jäähdyttävän fluidin avulla. /4,6,7/

Matala höyryn lauhtumislämpötila laskee lauhtumislämpötilaa, mikä nostaa höyryn entalpian muutosta turbiinin yli, mikä taas nostaa laitoksen sähköntuottoa. Lauhtumislämpötila pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena käyttämällä mahdollisimman kylmää jäähdyttävää fluidia ja pitämällä sen virtaus optima. Lisäämällä virtaavan fluidin virtausta kulutetaan enemmän sähköä virtauksen tuottamiseen, mutta saavutetaan matalampi höyryn lauhtumispaine, mikä lisää sähköntuotantoa. Jossain vaiheessa saavutetaan tilanne, missä lisäämällä jäähdyttävän fluidin virtausta

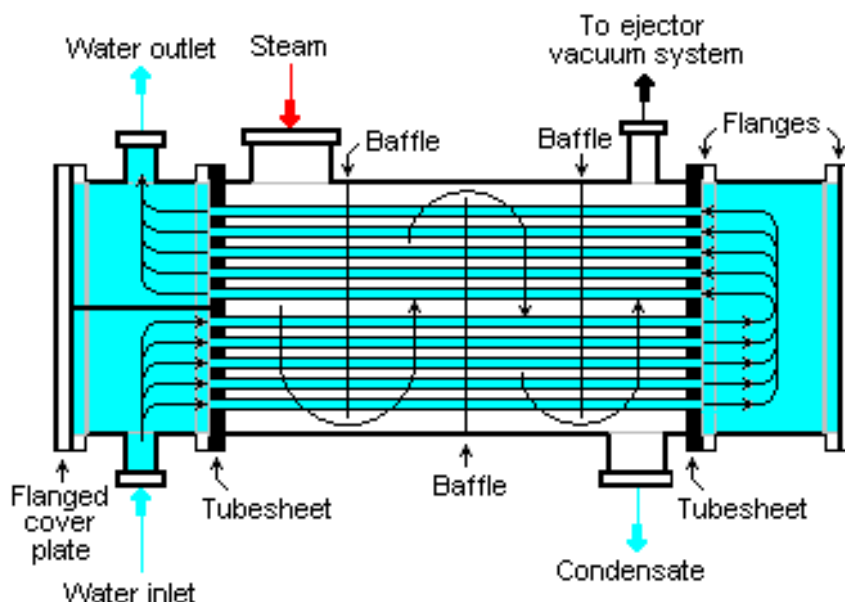
kasvaa fluidin virtauksen lisäämiseen kuluva sähköteho enemmän kuin generaattorin sähköntuotto./4/

Tästä eteenpäin tässä tekstissä viitattaessa lauhduttimeen tarkoitetaan höyryn ja veden välistä lämmönsiirrintä ellei toisin ole mainittu.

3.1 Suora vesilauhdutus

Lauhduttimessa putkissa virtaava jäähdytysvesi lauhduttaa höyryn putkien pintaan. Muodostunut lauhde valuu painovoiman vetämänä alaspäin, jonka jälkeen se pumpataan lauhdepumpuilla. Käyttämällä kylmää jäähdytysvettä saadaan lauhdutuslämpötila pidettyä mahdollisimman alhaisena, jolloin höyry lauhtuu lähes jäähdytysveden poistumislämpötilassa. Lauhdutin sijoitetaan välittömästi turbiinin alle. /4/

Suora vesilauhdutus (Kuva 1) on yleisin lauhdutusvoimalaitoksien lauhdutusmenetelmä pohjoismaissa.



Kuva 1 Vesilauhdutin /12/

3.1.1 Hyödyt

Fysikaalisten ominaisuuksien takia vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti ja tällöin virtaavan veden kapasiteettivirtaus on myös korkea. Tämän ansiosta suorassa vesilauhdutuksessa myös lauhdutukseen tarvittava sähköteho muodostuu matalaksi, kun lauhduttamiseen tarvitaan vain yksi pumppu ja sen tilavuusvirtaus on matala. Tällöin laitoksen omasähkönkäyttö muodostuu matalaksi.

Suora vesilauhdutus on investointikustannuksiltaan selvästi halvin lauhdutusmenetelmä. Muut lauhdutustavat vaativat lauhduttimen ja pumpun lisäksi muita komponentteja veden jäähdyttämiseksi. Lisäksi veden lämpötilavaihtelut vuositasolla ovat pienemmät kuin ilman, mikä johtaa suoralla vesilauhdutuksella tasaisempaan sähköntuottoon.

3.1.2 Haitat

Suoravesijäähdytys tarvitsee aina suuren vesistön johon johtaa höyryn lauhtumislämpö. Lauhduttimesta tuleva vesi lämmittää vesistöä. Jos vesistö ei ole suuri alkaa vesistön lämpötila nousta, mikä taas johtaa matalampaan sähkönsaantiin. Veden lämmittäminen aiheuttaa veden ekosysteemille muutoksia. Esimerkiksi Suomessa Olkiluodon edustalla jääpeite on huomattavasti ohuempi kuin muualla merellä. Nykyisin useissa maissa lauhdutukseen tarvittavaa vettä ei saa ottaa muualta kuin merestä. Esimerkiksi Saksassa ja Ranskassa suuret lauhdutusvoimalaitokset joutuvat jäähdyttämään Euroopan suurista joista ottamaansa vettä erillisessä jäähdytystornissa ennen sen laskemista takaisin jokeen ympäristöluvan saamiseksi. Nykyisin muualle kuin mereen lauhduttavan voimalaitoksen ympäristöluvan saaminen on hankalaa. Siksi vesistöksi rajoittuu käytännössä pelkästään meri. Tämä rajoittaa voimalaitoksien sijaintia voimakkaasti. /5/

Lauhutusvoimalaitoksissa pyritään hyvään sähköntuottoon, jolloin veden virtaus on myös korkea. Korkean vedenvirtauksen johdosta vesistöstä tulee veden mukana lai-

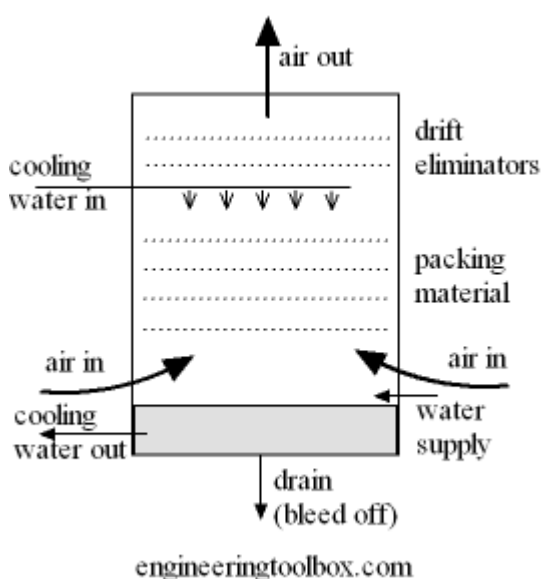
tokselle elävää orgaanista materiaalia, kuten kaloja ja levää. Tämä orgaaninen aines on siivilöitävä pois, mikä johtaa oman puhdistuslaitoksen rakentamiseen.

Merivesi sisältää aina eri suolojen ioneja, joiden suodattimen pois koituisi liian suureksi tehtäväksi. Jäähdytysveden mukana tulevat ionit aiheuttavat voimalaitosten lauhduttimissa korroosio-ongelmia, joiden välttämiseksi lauhduttimet on varustettava korroosiota kestäväillä materiaaleilla ja korroosiosuojalla. Tämä lisää tietenkin jonkin verran investointikustannuksia verrattuna muihin lauhdutusmenetelmiin./8/

Sähkön siirrossa tapahtuu aina häviötä ja siirtomatkojen kasvaessa myös häviöt kasvavat. Tällöin useissa maissa sähkön siirtäminen suuren vesistön äärestä pitkälle ei tule kannattavaksi, jolloin tarvitaan myös muita lauhdutusmenetelmiä.

3.2 Jäähdytystornilauhdutus

Jäähdytystorni- (Kuva 2) ja suoranvesijäähdytys ovat yleisimmät lauhdutusmenetelmät maailmassa. Jäähdytystornilauhdutuksessa höyryn laudelämpö siirtyy lauhduttimessa virtaavaan jäähdytysveteen. Lauhduttimesta vesi pumpataan jäähdytystorniin, missä se ruiskutetaan tornin huipulta alas. Samalla tornin läpi puhalletaan ilmaa tai ilma kulkeutuu tornin läpi painovoimaisesti ilman puhaltimia. Jäähdytystornissa vesi ja ilma ovat suorassa kosketuksessa keskenään eli kyseessä on niin sanottu märkä jäähdytys. /5/



Kuva 2 Jäähdytystorni /13/

Jäähdytystornissa osa jäähdytysvedestä höyrystyy ilmaan, jolloin ilman kosteus nousee ja samalla ilman entalpian muutos on suurempi kuin kuivassa jäähdytyksessä. Ilma poistuu jäähdytystornista kylläisenä kosteudesta. Jäähdytystornilauhdutuksessa höyrypiirin lauhdutin ei eroa suoranvesilauhdutuksen lauhduttimesta rakenteellisesti. Ainoa ero saattaa tulla materiaalien valinnassa.

3.2.1 Hyödyt

Jäähdytystornissa ilma ja vesi ovat suorassa kosketuksissa keskenään, mikä tehostaa lämmönsiirtoa voimakkaasti. Suoran kosketuksen ansiosta jäähdytysveden lämpötila laskee usein ympäristön lämpötilan tasolle. Teoriassa veden lämpötila voi laskea märän mittarin lämpötilan tasolle, joka voi tietyissä tilanteissa olla jopa alle ympäristö lämpötilan. Lisäksi märän jäähdytyksen ansiosta puhallettava ilman entalpian muutos on suuri, jolloin myös puhallettava ilmanmäärä on matalampi verrattuna muihin ilmajäähdytykseen perustuviin lauhdutusmenetelmiin. Märän jäähdytyksen ansiosta säästetään laitoksen omasähkönkäytössä.

Verrattuna suoraan vesijäähdytykseen kiertoaineena käytettävä vesi voi olla käsiteltyä, jolloin vesi ei ole niin aggressiivista. Tämän seurauksesta jäähdytystornilauhdutuksessa säästetään lauhduttimen ja putkistojen materiaali- valinnoilla.

3.2.2 Haitat

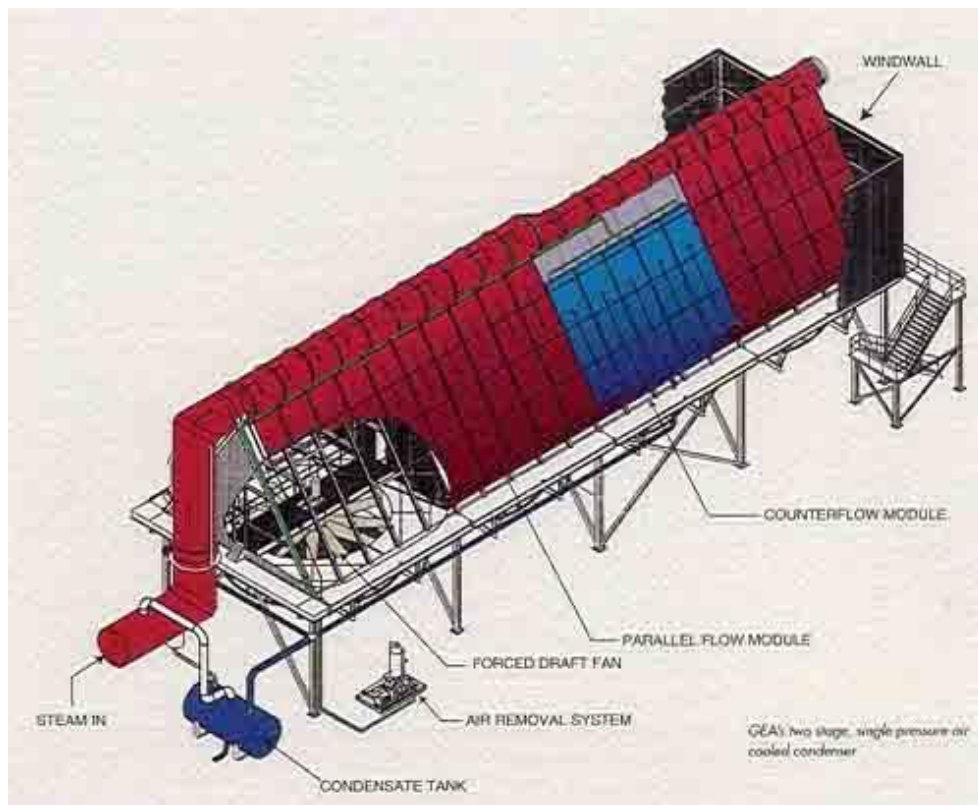
Ilman lämpötilan lisäksi ilman kosteus vaikuttaa voimakkaasti jäähdytystornilauhdutuksesta jäähdyttävän veden lämpötilaan. Tietyillä alueilla ilman kosteus voi nousta hyvinkin korkeaksi, jolloin märästä jäähdytyksestä ei ole juuri hyötyä.

Jäähdytystornilauhdutus vaatii pumpun vedenkierrättämiseen ja puhaltimia ilman puhaltamiseen. Näiden molempien sähkönkulutus lisää laitoksen sähkönomakäyttöä mikä taas johtaa pienempään sähkön hyötytehoon. Ylimääräiset komponentit lisäävät laitoksen investointi- ja huoltokustannuksia.

Ilma vie vettä mukanaan höyryn lisäksi aerosolina jäähdytystornissa. Täten jäähdytystornilauhduksen vedenkiertoon on lisättävä vettä. Veden tarve on kuitenkin merkittävästi pienempi kuin suoran vesilauhdutuksen tarvitsema vesimäärä. Lisäksi aerosolina ilmaan joutuneet vesipisarat aiheuttavat legionella – bakteeri tartunta-riskin. Näiden lisäksi korkeat tornit altistuvat voimakkailla tuulille, jotka saattavat ja ovat vaurioittaneet torneja. Muita sään aiheuttamat rajoitukset liittyvät alle 4 celsius asteen lämpötiloissa tapahtuviin veden kiteytymiseen eli jäähdytysvesi ei sada vetenä vaan lumena tornin huipulta alas. Tämä laskee tornin käytettävyyttä voimakkaasti. /9/

3.3 Suora ilmalauhdutin

Suora ilmalauhdutin (Kuva 3) on maailmanlaajuisesti harvinaisempi lauhdutusmenetelmä. Siinä höyrynlauhtumislämpö siirretään suoraan ilmaan erillisessä A-muotoisessa lauhduttimessa. Puhallettavan jäähdyttävän ilman avulla höyry lauhtuu lauhduttimessa, missä höyry ja ilma eivät ole suorassa kosketuksissa keskenään, jolloin ulkoilman kosteudella ei ole juuri merkitystä ilman entalpian muutokseen, vaan siihen vaikuttaa vain ilmanlämpötila. Ilmalauhduttavista voimalaitoksista 90% toimivat suoranilmalauhdutusperiaatteella. /10/



Kuva 3 Suora ilmalauhdutin höyrylle /14/

3.3.1 Hyödyt

Kuivan lämmönsiirron ansiosta ilma ei vie mukanaan vettä, jolloin koko laitoksen veden tarve on hyvin matala. Suoran ilmalauhdutuksen hyödyt rajoittuvatkin pienempään vedenkulutukseen verrattuna perinteisiin laitostyyppeihin. Verrattuna jäähdytystorniin laitoksen komponenttien määrä on pienempi johtuen höyryn suorasta lauhduttamisesta ilmalla.

3.3.2 Haitat

Tyypillisesti suoria ilmalauhduttimia asennetaan alueille, missä sähköntarve on korkeimmillaan päivällä ja matalimmillaan yöllä. Tyypillisesti näillä alueilla ilman lämpötila on korkeimmillaan päivällä ja matalimmillaan yöllä. Tämä johtaa matalampaan sähköntuotantoon silloin kuin sitä tarvittaisiin ja vastaavasti korkeaan silloin kun sitä ei tarvittaisi.

Kuivan jäähdtyksen takia suora ilmalauhdutin vaatii noin kolmekertaisen ilmavirtauksen höyryn lauhdutukseen. Suuren ilmavirtauksen takia lauhduttimen puhaltimien sähkökulutus on valtava. Käytännössä ilman virtaus on niin suuri, että lauhdutinta ei voida sijoittaa suoraan turbiinin alle, vaan höyry on kuljetettava suuria putkia pitkin laitoksen ulkopuolella olevaan massiiviseen ilmalauhduttimeen. /10/

3.4 Välillinen ilmalauhdutus

Välillinen ilmalauhdutus toimii kuten jäähdtystornilauhdutuskin, mutta jäähdtyksen veden jäähdtyttäminen toimii kuivalla jäähdtyksellä erillisissä ilmavesilämmönvaihtimissa. Tämä on maailmanlaajuisesti harvinainen tapa lauhduttaa höyryä, mutta sen osuus saattaa tulla kasvamaan. Esimerkiksi Metson ja Wärtsilän yhteisyritys MW Power valmistaa pieniä ja keskisuuria moduloituja voimalaitoksia, jotka käyttävät välillistä ilmalauhdutusta. /11/

3.4.1 Hyödyt

Valmiiksi moduloidut ja testatut ilmavesilämmönvaihtimet laskevat investointi- ja käyttökuluja. Lisäksi käyttämällä valmiita ilmavesilämmönvaihtimia, jotka on valmistettu puhtaissa tehtaissa, säästetään huoltokustannuksia.

Verrattuna suoraan ilmalauhdutukseen välillisen ilmalauhdutuksen valmiiden kompaktien ilmavesilämpövaihtimien käyttö tuo varmuutta voimalaitokselle. Yhden lämmönvaihtimen vikaantuessa voidaan sen kierto sulkea pois ja käyttää useita muita jäljellä olevia lämmönvaihtimia.

Välillisellä ilmalauhdutuksella voidaan käyttää veden lisäksi myös muita nesteitä, esimerkiksi veden ja glykolin seosta, jonka avulla voidaan jäähdtyttävän nesteen lämpötilaa laskea pakkasen puolelle. Laskettaessa kierrätettävän nesteen lämpötilan alle nollan celsius asteen säästetään merkittävästi pumppauskustannuksissa.

3.4.2 Haitat

Useampi lämmönvaihdin yhdistettynä veden kuivaan jäähdytykseen kasvattaa höyryn lauhdutuslämpötilaa. Ilmavesilämmönvaihtimessa vesi ja ilma eivät ole suorassa kosketuksissa keskenään, mikä nostaa poistuvan jäähdytysveden lämpötilan ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Kuten suorassa ilmalauhdutuksessakin välillinen ilmalauhdutus vaatii suuren tilan ilman matalan ominaislämpökapasiteetin johdosta.

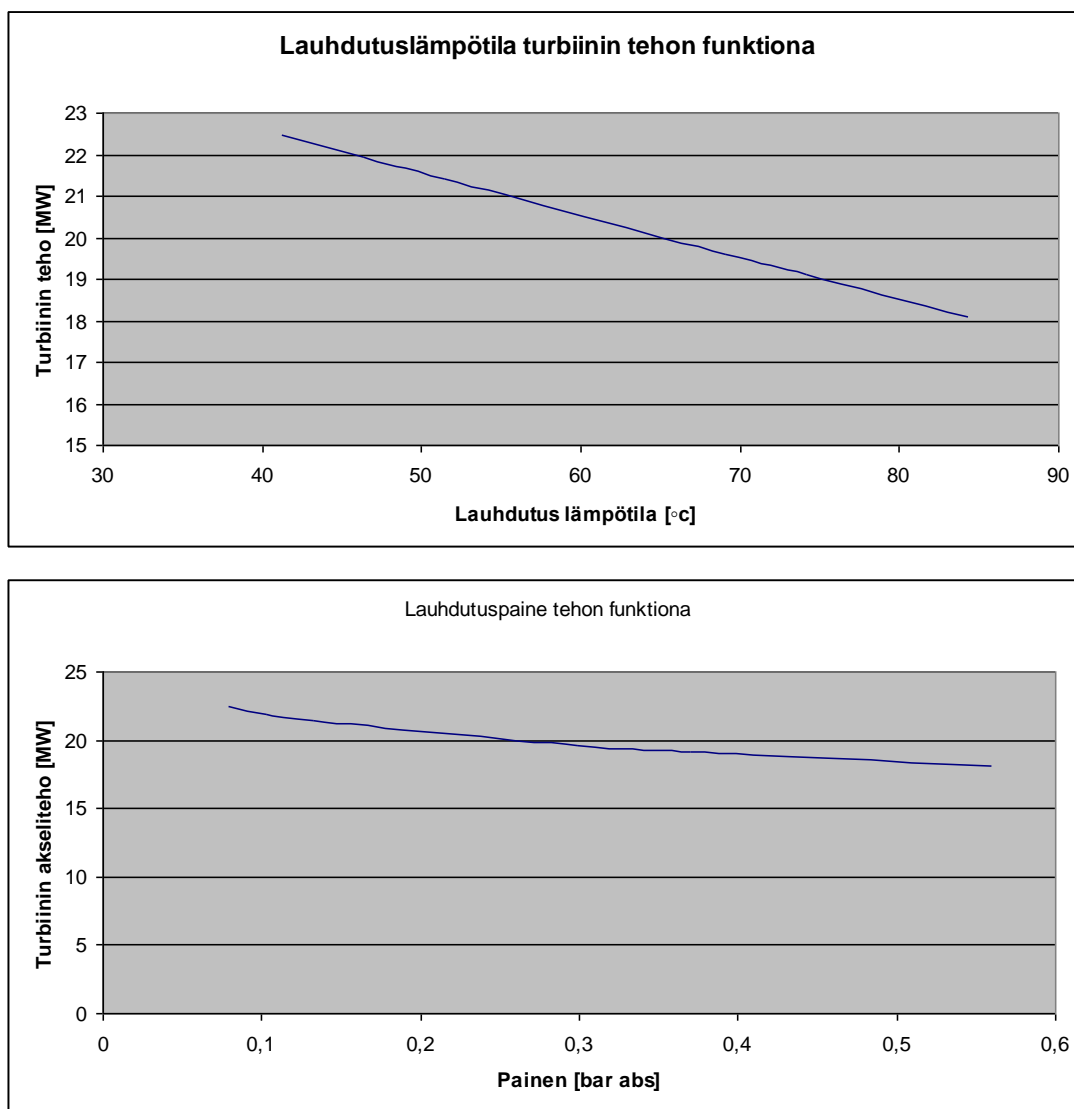
4 VOIMALAITOSPROSESSIN SIMULOINTI

Simulointi on suoritettu yksinkertaisella prosessilla, jotta tuloksiin vaikuttaisi mahdollisimman vähän häiriötekijöitä. Kaikissa tilanteissa höyryn arvot on pidetty samoina, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään. Kaikissa tilanteissa höyryn lämpötila on 510 °C, paine 60 bar_{abs} ja massavirtaus 20 kg/s.

Simuloinnissa on oletettu, että lauhduttimen asteisuus on kaksi astetta celsiusta. Lauhduttimesta lähtevän veden lämpötila on tällöin aina kaksi astetta lauhduttimeen tukevaa höyryä kylmempää. Valtaosa turbiinin jäävästä energiasta on peräisin höyryn paineenpudotuksesta ja siitä johtuvasta entalpian pudotuksesta. Tästä seuraa se, että lauhdutuslämpötila määrää turbiinin akselitehon.

Työn tulokset eivät ole absoluuttisia totuuksia, mutta kaikissa tilanteissa voimalaitosprosessi on pidetty samana. Vain lauhduttimen jälkeisiä komponentteja on muutettu. Tulokset ovat tällöin vertailukelpoisia keskenään.

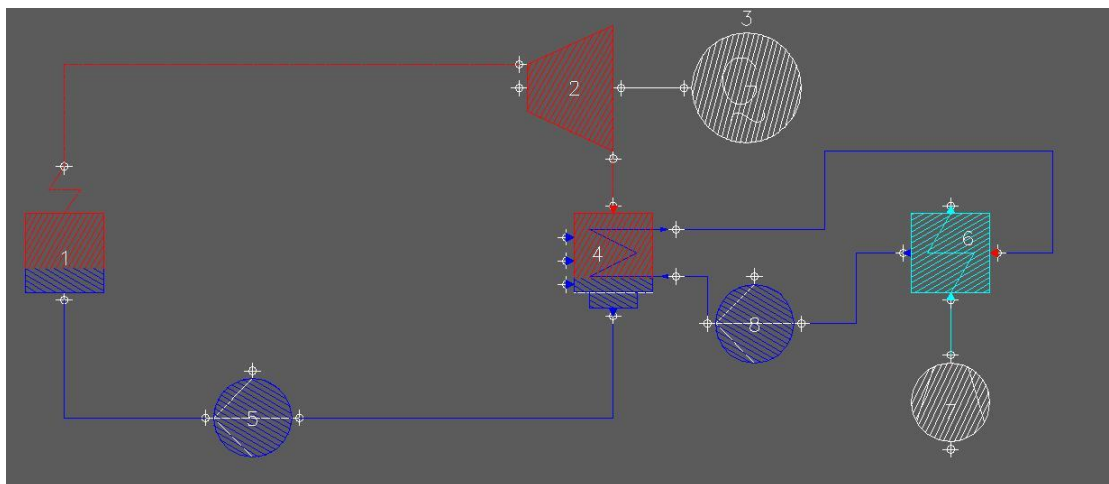
Turbiinin teho on verrannollinen turbiinille tulevan höyryn massavirtauksen, lämpötilan ja paineen lisäksi turbiinilta lähtevän höyryn lämpötilan ja paineen kanssa. Alla olevissa käyryissä (Kuva 4) on esitetty turbiinin akseliteho lauhduttimen paineen ja lämpötilan funktiona. Kuviot pätevät yllä olevilla höyryn arvoilla.



Kuva 4 Turbiinin akseliteho lauhtuttimen paineen ja lämpötilan funktiona

4.1 Ilmajäähdytys

Jäähdytys ilmalla tapahtuu siten, että turbiinin lauhtutukseen käytettävä vesi kulkee suljetussa järjestelmässä. Vesikierto on seuraavanlainen: vesi menee lauhtuttimelle ja lauhtuttaa turbiinista tulevan höyryn. Lauhtuttimesta vesi kulkeutuu ilma-vesilämpövaihtimelle, jossa vettä jäähdytetään ilmalla. Lämmönvaihtimesta vesi kulkee pumpun kautta takaisin lauhtuttimelle. Kuva 5 on Prosim-ohjelmasta ja siinä näkyy havainnollisesti veden kiertopiiri.



Kuva 5 Ilmajäähditys esitettynä Prosim-simulointiohjelmistolla

Turbiinista saatavaan akselitehoon vaikuttaa pääasiassa kolme muuttajaa: veden massavirtaus, ilman massavirtaus ja ilman lämpötila. Suurin vaikutus on tietenkin ilman lämpötilalla, sillä se määrää veden ja siten myös höyryn lämpötilatason. Harmillista on vain, että muihin muuttujiin voidaan vaikuttaa, mutta tärkeimpään eli ilman lämpötilaan ei voida.

Tietenkin turbiinin akselitehoon vaikuttaa käytettävä turbiini ja sen oheislaitteet. Tämä tarkastelu on jätetty tässä työssä pois, koska tulokset ovat joka tapauksessa vertailukelpoisia keskenään ja tarkoitus ei ole tutkia laitosta kokonaisuutena.

4.1.1 Pumppu

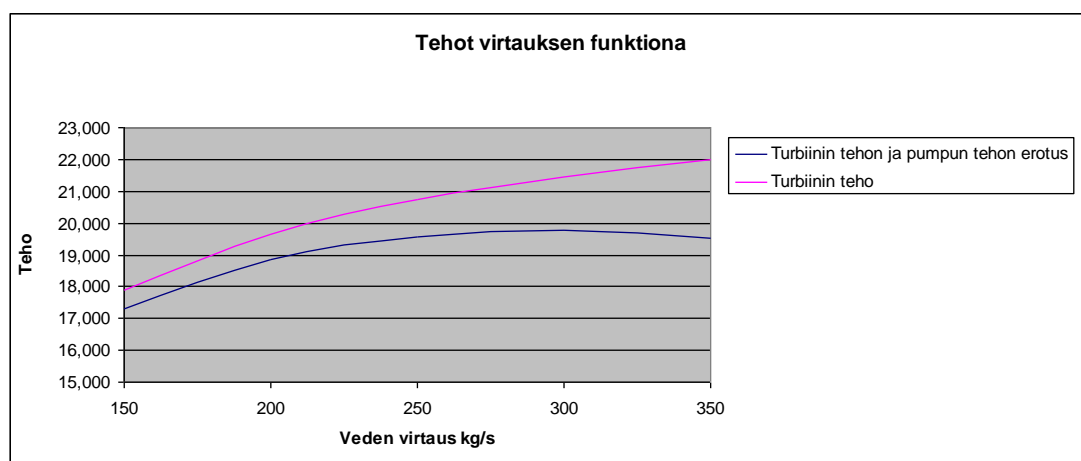
Pumpun tarkoitus on kierrättää vettä lauhduttimen ja lämmönvaihtimen välillä. Lisättäessä pumpun kierroslukua eli pumpattaessa enemmän vettä saadaan turbiinin akselitehoa lisättyä. Kuitenkin lisäämällä veden tilavuusvirtausta lisääntyy virtausvastus, jolloin lisääntyy pumpun sähkötehon kulutus. Tietyssä pisteessä saavutetaan tilanne, jolloin lisäämällä veden tilavuusvirtausta lisääntyy pumpun sähkönkulutus enemmän kuin turbiinin akseliteho. Tämä tilanne on optimipiste. Simuloinnin aikana havaitsin, että tämä piste oli kaikilla ilman lämpötiloilla lähes sama eli $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Laskettaessa pumpun sähköenergiankulutusta on putkiston ja lauhduttimen virtausvastus arvioitu ja ilmavesilämmönvaihtimen virtausvastus on saatu Alfa Lavalin Fincoin Select-ohjelman avulla. Tässä simuloinnissa on veden virtausvastuksen $0,0365$

m^3/s virtauksella olevan 50 kPa jolloin virtausvastus kertoimeksi tulee $50000/(0,0365^2) = 37530493$.

Pumpun paineen korotus lasketaan kaavalla: $\Delta p = K \cdot q_v^2$ esimerkiksi $37530493 \cdot 0,0365^2 = 50000$ Pa ja kun tähän lisätään vielä ilma-vesilämmönvaihtimen vastus saadaan kokonaispaineenkorotus.

Tuloksiin lisätään vain yhden lämmönvaihtimen aiheuttama paineenkorotus, sillä oletettavasti lämmönvaihtimet kytkettäisiin rinnan, jolloin vain osa virtauksesta kulkee yhden lämmönvaihtimen läpi. Pumpun teho saadaan pumpun paineen korotuksen ja tilavuusvirtauksen neliön tulona ja kertomalla saatu tulos hyötysuhteella, joka on oletettu olevan 0,8. Tällä tavalla laskemalla saadaan pumpun verkosta ottama sähköteho. Alla olevassa kuviossa (Kuva 6) on esitetty veden massavirtauksen vaikutus turbiinin akselitehoon ilman virtauksen ja lämpötilan ollessa vakio.



Kuva 6 Tehot veden massavirtauksen funktiona ilmajäähdytyksessä

Kuviosta nähdään selkeästi kuinka turbiinin tehon ja pumpun tehon erotus eli hyötyteho kasvaa veden massavirtausta nostamalla aluksi. Mitä suurempi erotus on sitä enemmän saadaan turbiinista sähkötehoa ulos.

Kuviosta nähdään myös, että nostamalla virtausta yli 300 kg/s pienenee hyötyteho. Tämä kohta on siis pumpattavan vesivirtauksen optimiarvo maksimiteholle.

4.1.2 Puhallin

Verrattuna pumppuun puhaltimen puhaltaman ilman tilavuusvirtaus vaikuttaa turbiinin akselitehoon huomattavasti enemmän. Aivan kuin pumpussa, myös puhaltimissa lisäämällä ilman tilavuusvirtaa kasvatetaan turbiinin akselitehoa, mutta samalla puhaltimien verkosta ottama teho kasvaa. Puhaltimien verkosta ottama sähkötehon laskenta toimii samalla tavalla kuin pumpun sähkötehon laskenta.

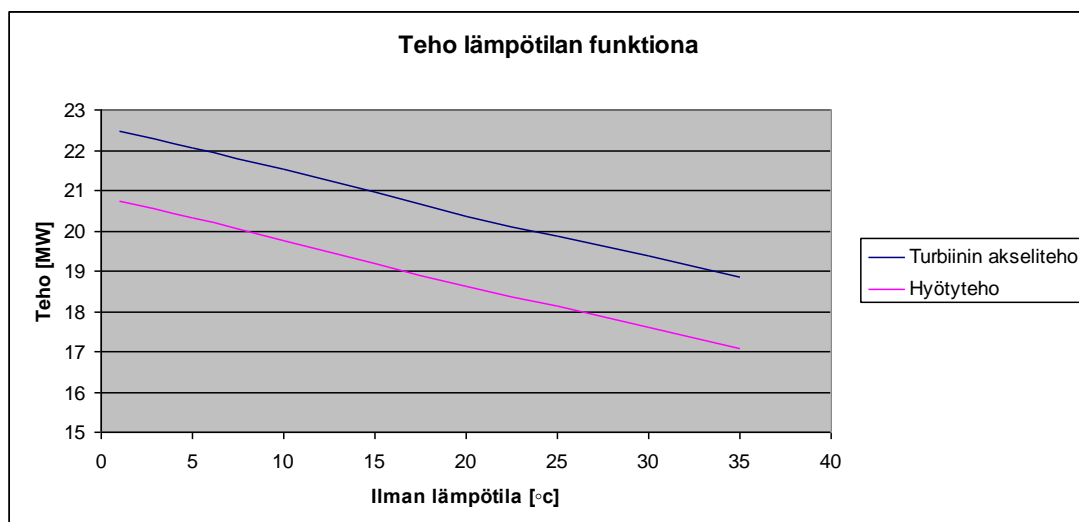
Kuten pumpulla myös puhaltimella saavutetaan tilanne, jolloin lisäämällä ilman tilavuusvirtaa kasvaa puhaltimien ottama sähköteho enemmän kuin turbiinin akseliteho kasvaa. Tämä optimi-ilmamäärän puhaltaminen vaihtelee hieman eri ilman lämpötiloilla. Kaikkein suurin vaikutus on kuitenkin ilman lämpötilalla, sillä se määrää suurimmaksi osaksi veden lämpötilantason, joka taas määrää lauhdutuspaineen.

Puhaltimien teho on laskettu Alfa Lavalin Fincoil Select-ohjelman avulla. Ohjelmalla on otettu ison lämmönvaihtimen SCAG-274-12-06N5-H-198-1Dn 125 (LIITE 1) esimerkkitapaukseksi.

Lämmönvaihtimen tiedoista selviää, että se on varustettu 7 puhaltimella joiden yhteisteho on 13 kW ja yhteisilmavirtaus on $129 \text{ m}^3/\text{s}$. Kyseisillä höyryn arvoilla tarvittaisiin noin 25 kpl kyseisiä lämmönvaihtimia, jolloin sähkönkulutus yhteensä olisi 325 kW ja ilmavirtaus vastaavasti $3225 \text{ m}^3/\text{s}$. Puhallinlakien mukaan tietyn ilmamäärän puhaltimeen tarvittava sähköteho on verrannollinen kolmanteen potenssiin.

4.1.3 Tulokset

Alla olevassa kuviossa (Kuva 7) on esitetty turbiinin akseliteho sekä pumpun ja puhaltimen tehojen erotuksen nettoteho ilman lämpötilan funktiona kyseisen lämpötilan optimipisteessä. Hyöty- eli nettoteho on laskettu vähentämällä turbiinin tehosta pumpun ja puhaltimien tehot.



Kuva 7 Tehot ilman lämpötilanfunktiona

Kuviosta nähdään, että turbiinin tuottama teho on likimain suoraan verrannollinen ilman lämpötilan kanssa. Kuviosta ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä virtausarvoista, sillä jokaiselle pisteelle on haettu veden ja ilman virtauksen optimiarvot.

Kuviosta ei voida vetää suoria johtopäätöksiä laitoksen hyötysuhteeseen, sillä ilman ollessa lämpimämpää on myös höyryn lauhtumispaine ja – lämpötila korkeampi, jolloin kattilan lämpöteho on suhteessa matalampi. Voidaan kuitenkin sanoa, että laitoksen hyötysuhde on sitä korkeampi mitä matalampi lauhtumispaine ja – lämpötila on.

Puhaltimen sähkönkulutus on laskettu sellaisella Alfa Lavalin lämmönvaihtimella, jonka puhaltimien ottama sähköteho on suuri. Myöhemmin esitetään tuloksia, joissa on käytetty pienemmällä sähköteholla toimivia varustettuja lämmönvaihtimia.

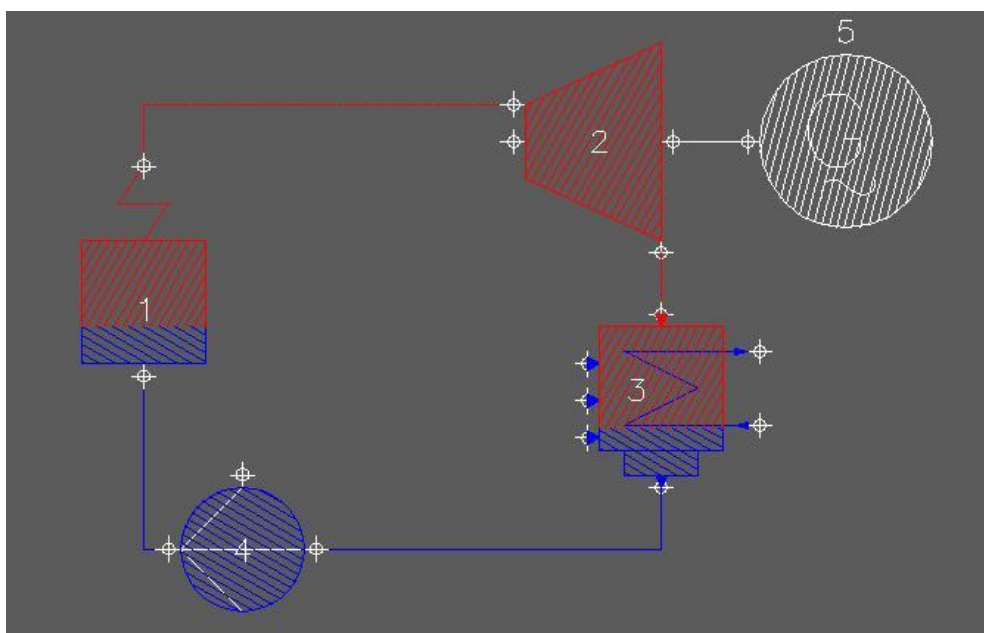
4.1.4 Yhteenveto

Optimipisteen etsiminen jokaiselle lämpötilalle oli työlästä, sillä prosessiin vaikutti kolme eri muuttujaa: ilman lämpötila, veden massavirtaus ja ilman tilavuusvirtaus. Tällöin simulointien määrä kasvoi suureksi, sillä jokaisin lämpötilan optimiarvot täytyi etsiä haarukoimalla ilman ja veden virtausarvoja.

Tulos ei anna kovin hyvää kuvaa lauhdutuksesta ilmalämmönvaihdinta käyttäen tällä prosessilla, sillä esimerkin SCAG-274-12-06N5-H-198-1Dn 125 -lämpövaihdin on suurin, jonka Fincoil Select -valintaohjelma antaa. Näitä vaihtimia tarvittaisiin kyseisessä prosessissa noin 25 kpl.

4.2 Lauhdutus vedellä

Vesilauhdutuksen toimintaperiaate on verrattain yksinkertaisempi kuin välillistä ilmajäähdystä käyttäen. Vesijäähdetyksessä on oletettu, että laitoksen lähettyvillä on vesistöalue, jonka lämmittämiseen höyryn lauhdelämpö käytetään. Tämä tapa on perinteisempi ja käytetään yleisesti isojen lauhdutusvoimalaitoksissa. Kuvassa 8 on esitys Prosim-simulointiohjelmasta.



Kuva 8 Suora vesilauhdutus Prosim –simulointiohjelmistolla

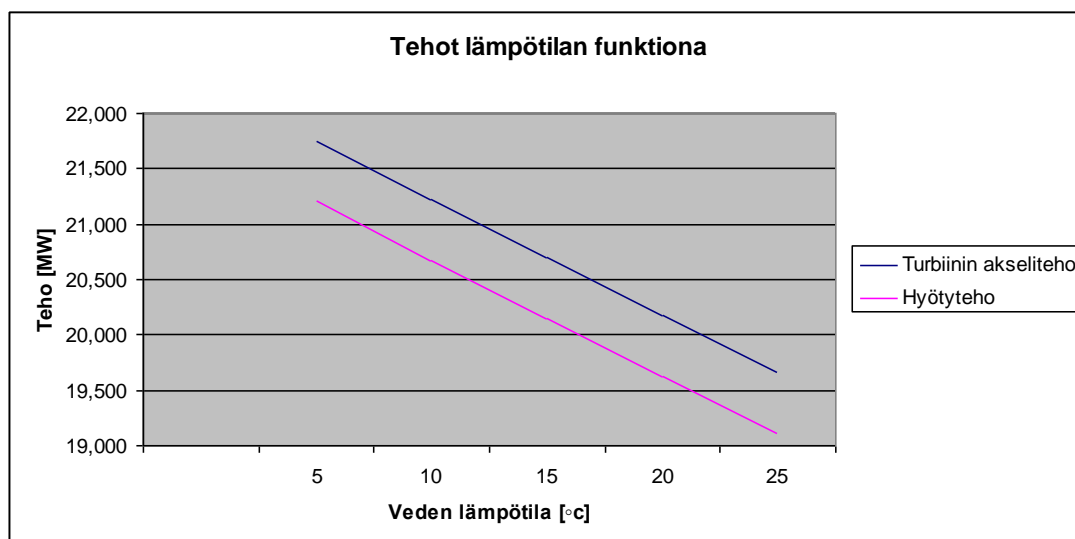
Suorassa vesilauhdutuksessa on pidetty kaikki höyryarvot samana kuin välillisessä ilmalauhdutuksessa.

Suorassa vesilauhdutuksessa turbiinin tehoon vaikutti vain kaksi muuttujaa: veden lämpötila ja veden massavirtaus. Lisättäessä veden massavirtausta kasvatetaan turbiinin akselitehoa matalamman lauhtumislämpötilan ansiosta, mutta samalla kasvate-

taan pumpun sähkötehoa. Tietyn virtauksen jälkeen veden virtauksen lisääminen kasvattaa pumpun sähkötehoa enemmän kuin turbiinin sähköteho kasvaa. Simulointi on tehty etsien kyseistä virtausarvoa. Pumpun sähköntehon laskemiseksi on pumpun hyötysuhteen oletettu olevan 0,8 ja lauhduttimen ja putkiston yhdistetty virtausvastus on sama kuin välillisessä ilmalauhdutuksessa. Pumpun ottaman sähköntehon laskennan määrittäminen tapahtuu samalla tavalla kuin välillisen ilmalauhdutuksen pumpun sähköntehon laskeminen.

4.2.1 Tulokset

Optimipisteiden hakeminen oli suorassa vesilauhdutuksessa helpompaa, johtuen vähäisemmistä muuttujien lukumäärästä. Alla olevassa kuviossa (Kuva 8) on esitetty tehot veden lämpötilan funktiona.

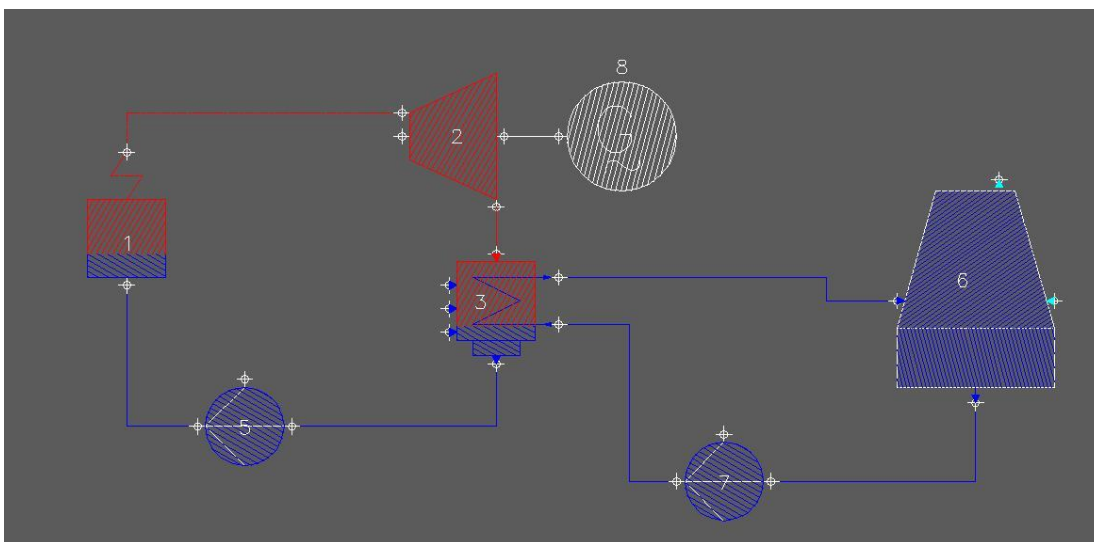


Kuva 8 Tehot lämpötilan funktiona suorassa vesilauhdutuksessa

Kuviosta nähdään, että hyötyteho ja turbiinin akseliteho ovat suoraan verrannollisia veden lämpötilaan. Tuloksista huomataan, että turbiinin akseliteho ja hyötytehon erotus on lähes vakio. Tämä tarkoittaa sitä, että veden virtauksen optimiarvo on kaikilla veden lämpötiloilla sama.

4.3 Vesitornilauhdutus

Vesitornilauhdutuksessa (Kuva 9) höyryn lauhduttaa lauhduttimessa jäähdytysvesi, joka lauhduttimen jälkeen pumpataan jäähdytystorniin jäähtymään. Tornissa vesi jäähdytetään ilmalla. Ilma ja vesi ovat suorassa kosketuksessa keskenään, jolloin osa vedestä höyrystyy ilmaan. Kyseessä on siis niin sanottu märkä jäähdytys.



Kuva 9 Vesitornijäähdytys esitettynä Prosim-simulointiohjelmalla

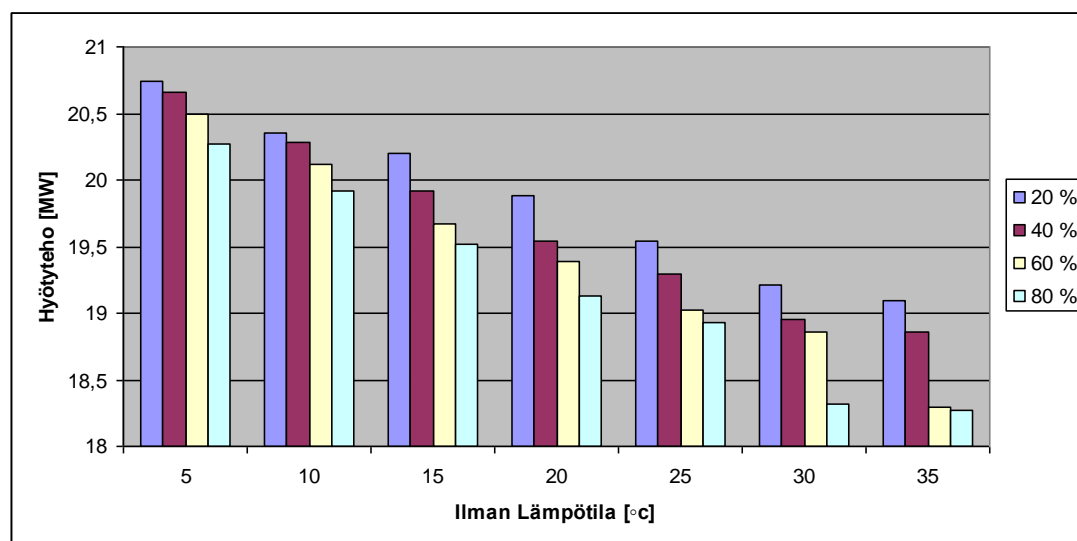
Toisin kuin välillisessä ilmalauhdutuksessa vesitornilauhdutuksessa turbiinin tehoon vaikuttaa ilman virtauksen ja lämpötilan sekä veden virtauksen lisäksi märän jäähdytyksen johdosta myös ilman kosteus. Simuloinnin yksinkertaistamiseksi on veden virtauksen optimi oletettu olevan kaikilla ilman kosteuden ja lämpötilan arvoilla olevan sama. Veden virtauksen optimi on etsitty tietyllä ilman kosteudella ja lämpötilalla ja pidetty samana kaikissa muissakin virtauksissa. Tähän yksinkertaistukseen päädyttiin edellisten tapausten tulosten perusteella, koska niissä veden virtauksen optimiarvo on lähes vakio. Tämä aiheuttaa pientä virhettä työn tuloksiin, mutta sen vaikutus on minimaallinen.

Lauhduttimen ja putkien painehäviö on oletettu olevan sama kuin edellisissä simuloineissa. Näiden aiheuttamaan virtausvastukseen on lisätty arvioitu jäähdytystornin aiheuttama virtausvastus.

Ilman virtausvastus jäähdytystornin yli on arvioitu päättelyn ja kirjallisuuden avulla. Puhaltimen sähköteho on laskettu arvioidun ilman virtausvastuksen ja puhaltimen hyötysuhteen avulla.

4.3.1 Tulokset

Alla olevassa kuviossa (Kuva 10) on esitetty jäähdytystornilauhdutuksen hyötyteho ilman lämpötilan funktiona optimipisteissä.

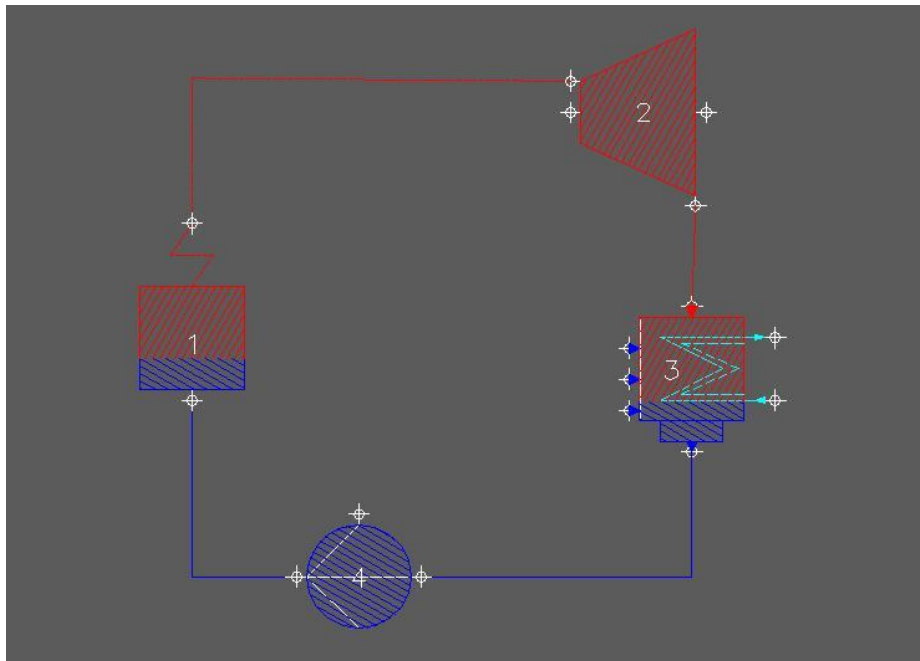


Kuva 10 Jäähdytystornilauhdutuksen hyötyteho ilman lämpötilan funktiona optimipisteissä

Kuviosta näkee selkeästi ilman kosteuden vaikutus saatavaan hyötytehoon. Hyötyteho on verrattain suoraan verrannollinen ilman lämpötilan kanssa eri ilman kosteuksilla. Jokaisella kosteuden ja lämpötilan optimipisteessä on omat ilman virtauksen arvot.

4.4 Suora ilmalauhdutus

Suorassa ilmalauhdutuksessa (Kuva 11) höyry lauhdutetaan ilmalla. Ilma ja höyry eivät ole kosketuksissaan keskenään, jolloin lämmönsiirto on kuiva.



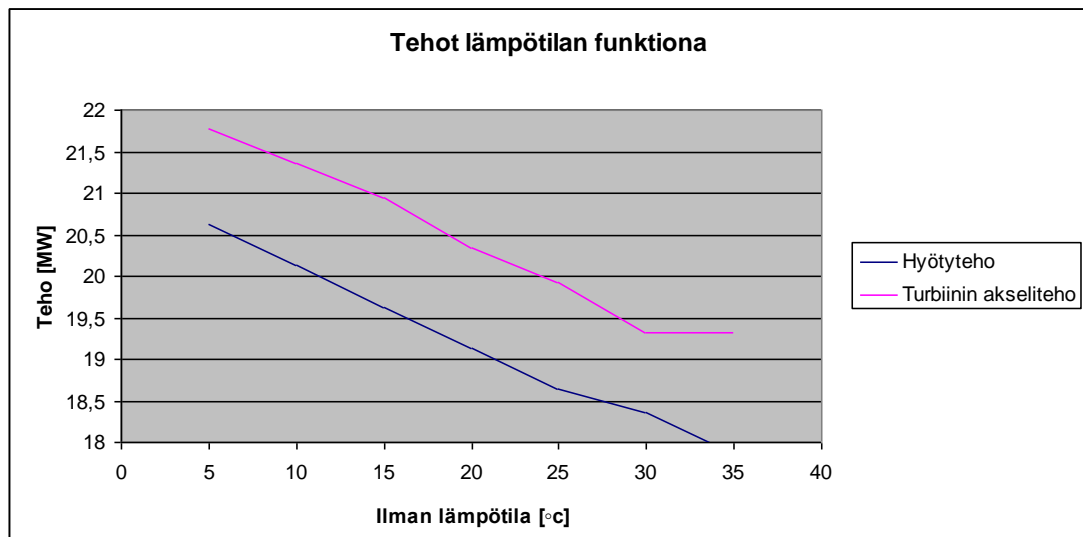
Kuva 11 Suora ilmalauhdutus esitettynä Prosim –simulointiohjelmalla

Tapauksen simulointi oli verrattain yksinkertaisempaa, sillä turbiinin akselitehoon vaikutti vain ilman lämpötila ja sen virtaus.

Puhaltimen sähkönkulutus on laskettu arvioimalla lauhduttimen ilmalle aiheutta virtausvastus. Virtausvastuksen avulla on laskettu puhaltimien ottama sähköteho puhallinlakien mukaisesti.

4.4.1 Tulokset

Alla on esitetty (Kuva 12) suoranilmalauhdutuksen tehot ilman lämpötilan funktiona.



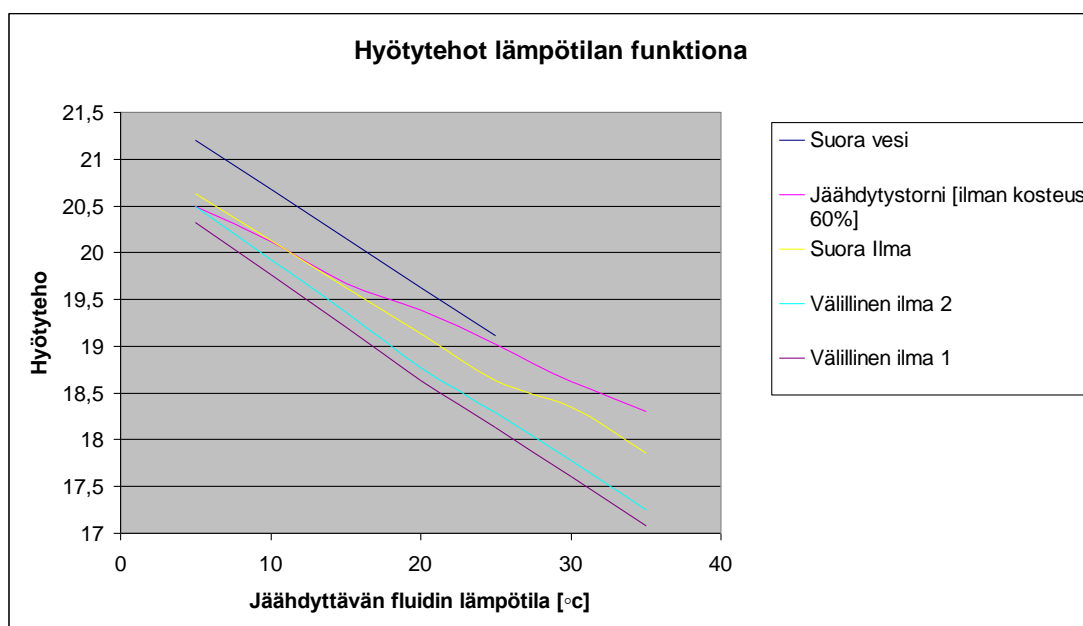
Kuva 12 Suoran ilmalauhdutuksen tehot lämpötilan funktiona

Tuloksista nähdään, että hyötyteho on verrattain suoraan verrannollinen ilman lämpötilan kanssa. Jokaisessa pisteessä on omat ilman virtauksen arvot, mutta turbiinin akselitehon hyötytehon erotuksen muutoksen avulla voi päätellä miten ilman virtauksen optimiarvo muuttuu eri ilman lämpötiloilla.

5 ERI LAUHDUTUSMENETELMIEN VERTAILU

5.1 Simulointitulosten vertailu

Alla olevassa kuviossa (Kuva 13) on esitetty yhdistetty eri lauhdutusmenetelmien hyötyteho jäähdyttävän fluidin lämpötilan funktiona. Kuvioon on otettu jäähdytystornin hyötyteho ilman 60%:n suhteellisella kosteudella. Välillinen ilma 2 on Alfa Lavalin matalamman energiakulutuksen (LIITE2) ilmavesilämmönvaihdin.



Kuva 13 Eri lauhdutusmenetelmien vertailu (LIITE 3)

Kuviosta voidaan päätellä, että suora vesilauhdutus on selkeästi paras lauhdutuskeino hyötytehon optimoimiseksi. Veden lämpötila on katkaistu 25 °C, koska harvoilla alueille veden lämpötila kasvaa yli 25 °C.

5.2 Eri lauhdutusmenetelmien vertailu.

Eri lauhdutusmenetelmien vertailu keskenään on verrattain hankalaa, sillä jonkin toisen menetelmän etu voi olla haitta toiseen menetelmään nähden. Siksi tulosten helpposti visuaalisesti esittämiseksi on alla esitetty vertailutaulukko eri lauhdutusmenetelmien välillä. Taulukon lukeminen käy seuraavasti:

	x	y
x	-	x:n etu y:n nähden
y	y:n etu x:n nähden	-

	Suoravesi	Jäähdytystorni	Suorailma	Välillinen Ilma
Suoravesi	-	-Matalampi oma sähkökäyttö -Tasaisempi sähkötehotuotto -Ei legionella tartunta riskiä	- Yksinkertaisempi ja toimivampi rakenne. - Parempi ja tasaisempi sähköntuotanto	-Investointi kustannuksiltaan halvempi ratkaisu. -Selvästi parempi hyötysähkönteho
Jäähdytystorni	-Pienempi veden tarve ja pienempi vaikutus ympäristölle - Voimalaitoksen sijainti ei rajoitu suuren vesistön äärelle	-	-Märän jäähdytyksen ansiosta pienempi ilmanvirtaus -	-Märän jäähdytyksen ansiosta pienempi ilmanvirtaus -
Suorailma	- Veden saata- vuus ei rajoita voimalaitoksen sijaintia. - Ei vaikutuksia vesistöihin.	- Voimalaitoksen tarvitsema vesimäärä ole- maton. - Laajempi toi- minta alue	-	- Ei tarvitse eril- listä pumppua veden kierrättä- miseksi - Vähemmän lämmönvaihtimia

				= matalampi lämpötila taso
Välillinen Il- ma	- Veden saata- vuus ei rajoita voimalaitoksen sijaintia. - Ei vaikutuksia vesistöihin.	- Voimalaitok- sen tarvitsema vesimäärä ole- maton. - Laajempi toi- minta alue	-Höyryä ei tarvitse kul- jettaa kauas turbiinista. - Vähäisempi huollon tarve - Puhtaampi - Markkinoilla valmiita kompekteja paketteja, joiden käyttäminen no- peuttaa rakentamista ja alentaa investointikus- tannuksia.	-

5.3 Yhteenveto ja loppupäätelmät

Välillinen ilmalauhdutus soveltuu hyvin kompakteihin valmiiksi moduloituihin voimalaitoksiin, silloin kun riittävän suurta vesistöä ei ole saatavilla. Moduloinnin etuna on nopea voimalaitoksen rakentaminen ja käyttöönotto ilman suurempaa erillistä suunnittelua. Suorat ilmalauhduttimet vaativat jonkin asteista suunnittelua, koska esimerkiksi MW Powerin moduloidut voimalaitokset ovat eri tehoisia. Suorat ilmalauhduttimet tilataan pakettina ja niiden valtavan koon takia ne on aina koottava paikan päällä.

Välilliset ilmalauhduttimet kootaan puhtaissa tehtaissa, mistä toimitettuna ne ovat koeponnistettuja ja koekäytettyjä. Valmiit lämmönvaihtimet täytyy rakennuspaikalla vain asentaa, joten ne ovat käyttövalmiita hyvinkin nopeasti. Lisäksi muuttamalla välillisten ilmalauhduttimien määrää on ne helppo räätälöidä asiakkaan tarpeiden mukaan.

Välillinen ilmalauhdutin ei ole niin häiriöherkkä kuin suora ilmalauhdutin, sillä yhden lämmönvaihtimen vikaantuessa tai huolettaessa sitä sen voi irrottaa kierrosta ja voimalaitos voi jatkaa toimintaansa. Yhdellä suoralla ilmalauhduttimella laitteen rik-

koontuessa tai huollon aikana voimalaitos on ajettava alas, mikä lisää käyttökustannuksia.

LÄHTEET

- /1/ Alfa Laval Oy:n kotisivut. [Viitattu 10.12.2010]
http://local.alfalaval.com/fi-fi/tietoa_alfa_lavalista/pages/default.aspx
- /2/ <http://fi.wikipedia.org/wiki/Lauhdutin> [Viitattu 7.3.2011]
- /3/ <http://fi.wikipedia.org/wiki/Faasimuutos> [Viitattu 7.3.2011]
- /4/ Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen - Voimalaitostekniikka – 2008
- /5/ Condensers And Condenser Cooling Systems [pdf-dokumentti]. Saatavissa:
<http://www.mrs-photoworld.com/IMTE%20AG/2-2004-08.pdf>
- /6/ <http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/energy/research/fluidynamics/research/highspeed/orc/sivut/default.aspx> [Viitattu 7.3.2011]
- /7/ SPX – Cooling Technologies[pdf-dokumentti] SPX-ACC-06-2008. Saatavissa: <http://spxcooling.com/pdf/ACC-06.pdf>
- /8/ http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_condenser 11.12.2010 [Viitattu 7.3.2011]
- /9/ Chapter–Cooling [pdf-dokumentti]. Saatavissa:
www.retscreen.net/fichier.php/898/Chapter-Cooling%20Towers.pdf
- /10/ SPX – Cooling Technologies [pdf-dokumentti] SPX-Dry-Cooling.
Saatavissa: www.spx.com
- /11/ [http://www.mwpower.fi/mwpower/mwpower_pages.nsf/WebWID/WTB-090524-22575-77914/\\$File/Biopower_5_screen.pdf](http://www.mwpower.fi/mwpower/mwpower_pages.nsf/WebWID/WTB-090524-22575-77914/$File/Biopower_5_screen.pdf) [Viitattu 12.3.2011]
- /12/ http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_condenser [Viitattu 15.3.2011]
- /13/ http://www.engineeringtoolbox.com/cooling-tower-efficiency-d_699.html [Viitattu 15.3.2011]
- /14/ http://www.gea-energytechnology.com/opencms/opencms/gas/en/products/Direct_Air-Cooled_Condensers.html [Viitattu 15.3.2011]



Alfa Laval Vantaa Oy, Ansatie 3, FI-01740 Vantaa, FINLAND
Tel. +358-9-8944 1, Fax. +358-9-878 1221, <http://www.fincoil.fi/>

Printed: 25.11.2010 17:22:13

FincoilSelect v.4.5c.107 / I.C-1.3 (16-Jan-2009)

LIQUID COOLER SELECTION (dry cooler)

Product: SCAG-274-12-06N5-H-198-1DN 125

Price: -

Liquid

Water

Performance

Variable:	Desired:	Calculated:
Cooling cap.:	1750 kW	1750 kW
Liquid in:	53,0 °C	53,0 °C
Liquid out:	41,0 °C	41,4 °C
Liquid flow:		36,5 l/s
Pressure drop:	< 100 kPa	51 kPa
Air in:		35,0°C / 60 %
Air out:		47,3°C / 31 %

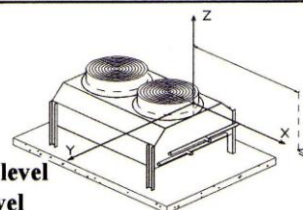
Fans

Air flow:	129 m ³ /s (total)
Rows x fans/row	1 x 7 pcs
Diameter:	Ø1236 mm
Speed:	971 rpm
Nom.power inp.:	13 kW/piece (+20°C)
Power input:	11 kW/piece (calculated)
Max. current:	27 A (-30°C)
Voltage:	3/400V/50Hz

Sound data

Maximum: 80 dB(A)
Calc. press. level (Lp): 77 dB(A)
Observation point: (10, 0, 0) m
Eurovent (EN 13487): 78 dB(A)

125	250	500	1000	2000	4000	8000	[Hz]
84	80	74	70	64	61	63	[dB] pressure level
112	110	108	106	103	100	97	[dB] power level



Further technical data

Length: ~13200 mm	Area: 4317 m ²	Connection size: DN 125
Width: 2400 mm	Internal volume: 700 dm ³	Water jets: No
Height: 1800 mm	Net weight: 4000 kg	
Fin spacing: 2.3 mm	Shipping volume: 51,9 m ³	

NOTE! Number of notes in calculation: 1 pcs!

Further data: (see symbols in brochure)

Overall dim [mm]:	Fixing points [mm]:	Energy class: E
B = 2400	No. of fixing points: 8 pcs	
B1 = 1305	C = 12600	
H = 1800	C1 = 3600	
H1 = 2440	C2 = 5400	
L = 13200	C3 = 3600	
	E = 2360	
	E1 = 1040	





Alfa Laval Vantaa Oy, Ansatie 3, FI-01740 Vantaa, FINLAND
Puh. 09-8944 1, Fax. 09-878 1221, <http://www.fincoil.fi/>

Tulostettu: 4.9.2009 14:08:02

FincoilSelect v.4.5c.107 / I.C.-1.3 (16-Jan-2009)

NESTEJÄÄHDYTTIMEN VALINTA

Valittu laite: SCAG-274-12-08N5-H-396-1DN 125

Hinta: -

Jäähdytettävä neste:

Vesi

Suoritusarvot

Suure:	Tavoite:	Toteutunut:
Jäähdytysteho:	1750 kW	1750 kW
Tuleva neste:	53,0 °C	53,0 °C
Lähtevä neste:	41,0 °C	41,2 °C
Nestevirta:		36,0 l/s
Painehäviö:	< 100 kPa	7 kPa
Tuleva ilma:		30,0°C / 60 %
Lähtevä ilma:		45,9°C / 25 %

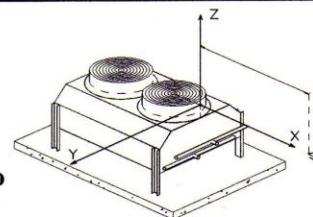
Puhaltimet

Ilmavirta:	99,6 m ³ /s (kok.-ilmamäärä)
Sijoitus:	1 x 7 kpl
Halkaisija:	Ø1236 mm
Pyörimisnopeus:	731 rpm
Nim. ottoteho:	6,5 kW/kpl (+20°C)
Ottoteho:	6,0 kW/kpl (käyttötilanteessa)
Max. virta:	17 A (-30°C)
Verkko:	3/400V/50Hz

Äänitiedot

Tavoitetaso: 80 dB(A)
Painetaso: 70 dB(A)
Havaintopiste: (10, 0, 0) m
Eurovent (EN 13487): 72 dB(A)

125	250	500	1000	2000	4000	8000	[Hz]
77	74	67	63	57	54	56	[dB] painetaso
106	104	101	99	96	93	90	[dB] tehotaso



Mittatiedot

Pituus:	~13200 mm	Pinta-ala:	4317 m ²	Yhdekoko:	DN 125
Leveys:	2400 mm	Sisätilavuus:	699 dm ³	Vesisuutin:	Ei
Korkeus:	1800 mm	Nettopaino:	4000 kg		
Lamellijako:	2.3 mm	Pakkauksen tilavuus:	51,9 m ³		

Laskennassa huomautuksia: 2 kpl!

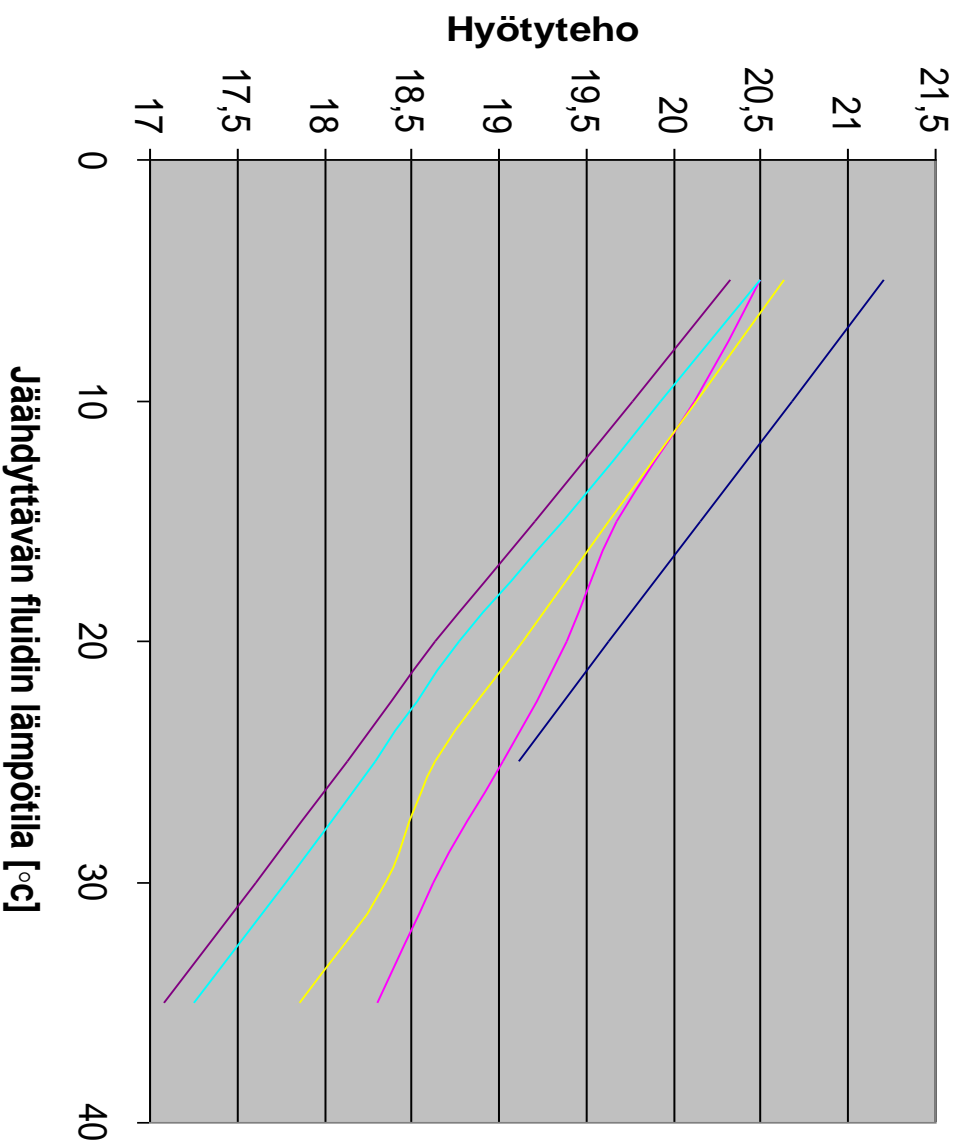
HUOM! Yhteet sijaitsevat laitteen eri päädyissä!

Muut tiedot: (katso symbolien merkitykset esitteestä)

Päämitat [mm]:	Kiinnitysmat [mm]:	Energialuokka: D
B = 2400	Kiinnityspist. 8 kpl	
B1 = 1305	C = 12600	
H = 1800	C1 = 3600	
H1 = 2440	C2 = 5400	
L = 13200	C3 = 3600	
	E = 2360	
	E1 = 1040	



Hyötätehot lämpötilan funktiona



— Suora vesi
— Jäähdytystorni [ilman kosteus 60%]
— Suora ilma
— Väiläinen ilma 2
— Väiläinen ilma 1